

- лирование в задачах проектирования систем управления сложными объектами. Калининград: Изд-во КГТУ, 2011.
4. *Khan J.A., Pal D., Morse J.S.* // Hazardous Waste and Hazardous Materials. 1993. Vol. 10 (1). P. 81–95.
 5. *Leger C.B., Cundy V.A., Sterling A.M.* // Environmental Sci. Technol. 1993. Vol. 27. P. 677–690.
 6. *Мешков Е.И.* // Изв. вузов. Цв. металлургия. 2006. № 4. С. 71–74.
 7. *Мешков Е.И.* // Там же. С. 75–79.
 8. *Мешков Е.И.* // Цв. металлы. 2007. № 5. С. 36–39.
 9. *Мешков Е.И.* // Там же. 2008. № 3. С. 61–65.
 10. *Мешков Е.И., Герасименко Т.Е., Ковалёва М.А.* // Цв. металлургия. 2012. № 4. С. 53–56.

УДК 669.536.22

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ФИЛЬТРАЦИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЦИНКА

© 2014 г. **А.Л. Рутковский, Д.Н. Дюнова**

Северо-Кавказский горно-металлургический институт
(государственный технологический университет), г. Владикавказ

Статья поступила в редакцию 08.06.14 г., доработана 30.06.14 г., подписана в печать 07.07.14 г.

Разработана математическая модель процесса фильтрации в производстве цинка, основанная на уравнениях материального баланса по расходам технологических сред и концентрациям отдельных компонентов. Модель позволяет определять расходы и количества получаемых продуктов процесса, оценивать его текущее состояние и прогнозировать будущие состояния.

Ключевые слова: математическая модель, процесс фильтрации, производство цинка, статическая характеристика, материальный баланс.

A mathematical model of the filtration process in zinc production based on material balance equations by consumptions of production media and concentrations of separate components is developed. The model enables one to determine consumptions and amounts of fabricated products, evaluate its current state, and predict future states.

Keywords: mathematical model, filtering process, zinc production, static characteristic, material balance.

ВВЕДЕНИЕ

Фильтрационному разделению промышленных пульп, которое на сегодняшний день является одним из самых важных и сложных переделов и часто выступает лимитирующей стадией металлургического производства, в настоящее время уделяется значительное внимание [1]. Результаты работы большинства цинк-электролитных предприятий во многом определяются эффективностью процессов фильтра-

ции цинковых кеков, так как своевременный отбор твердого остатка от выщелачивания является одним из факторов, стабилизирующих процесс переработки концентратов [2, 3]. Разделение технологических сред фильтрацией сводится к решению важных технологических задач, связанных со снижением потерь водорастворимого цинка с кеками и компенсацией потерь влаги во всей технологической цепочке

Рутковский А.Л. – докт. техн. наук, профессор кафедры теории и автоматизации металлургических процессов и печей СКГМИ (362000, РСО-Алания, г. Владикавказ ул. Николаева, 44). Тел.: (88672) 74-38-15. E-mail: Rutkowski@mail.ru.

Дюнова Д.Н. – канд. техн. наук, доцент той же кафедры. E-mail: Dunova_DN@mail.ru.

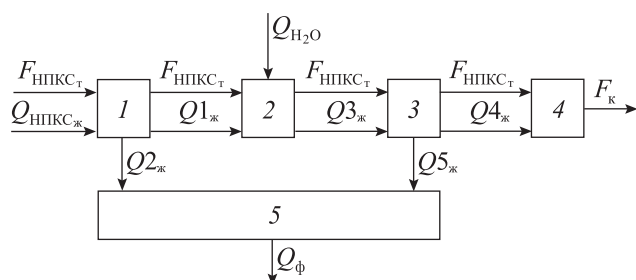


Рис. 1. Схема процесса фильтрации цинковых кеков

1 — первая стадия фильтрации, 2 — репульпация кеков, 3 — вторая стадия фильтрации, 4 — сушка цинковых кеков, 5 — операция объединения фильтратов
Обозначения параметров приведены в тексте

производства цинка. Классической технологией предусмотрены: фильтрация сгущенной пульпы кислого выщелачивания в виде нижнего продукта кислых сгустителей (НПКС) в 2 стадии, промежуточная репульпация от водорастворимого цинка и сушка отмытых цинковых кеков [4]. Схематически исследуемый передел представлен на рис. 1.

Одним из направлений повышения эффективности разделения пульп посредством фильтрации является совершенствование ее математического описания. Теоретические и методологические основы математического моделирования данного процесса, учитывающие особенности его гидродинамики и теплообмена, изложены в работах [3, 5–8]. В результате исследования влияния различных факторов на фильтруемость пульп цинкового производства получены и теоретически обоснованы статистические уравнения, описывающие зависимости времени фильтрования от соотношения жидкой и твердой фаз НПКС, содержания кремнезема в твердых продуктах НПКС, pH верхнего продукта кислых сгустителей (ВПКС), концентрации железа в растворах от выщелачивания вельц-оксида [9–11]. Математические модели регрессии, предложенные в работе [12], позволяют найти оптимальные параметры выщелачивания и состав огарка, обеспечивающие минимальное время фильтрации. Задача определения оптимальных условий фильтрования промышленных пульп в целях уменьшения влажности и содержания водорастворимого цинка в цинковых кеках решена авторами [13].

Целью настоящей работы является создание математической модели процесса фильтрации цинковых кеков, позволяющей определять расходы и количества образующихся полупродуктов, оценивать его текущее состояние и прогнозировать перспективные.

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Основными входными параметрами фильтрации являются расход твердого остатка от выщелачивания ($F_{\text{НПКСТ}}$), расход жидкой фазы НПКС ($Q_{\text{НПКСЖ}}$) и расход воды на репульпацию ($Q_{\text{H}_2\text{O}}$), а к выходным относятся расход фильтратов ($Q_{\text{Ф}}$), объединяемых и возвращаемых на кислое выщелачивание, и расход кека ($F_{\text{К}}$), поступающего на вельцевание. Главным возмущающим фактором, осложняющим процесс, является переменный химический состав НПКС. Математическая модель процесса фильтрации состоит из балансовых соотношений по твердой и жидкой фазам, а также по их компонентам, составленных для каждой стадии исследуемого технологического передела.

Запишем уравнение материального баланса по жидкой фазе для первой стадии фильтрации:

$$Q_{1\text{Ж}} = \frac{M1}{1 - M1} \frac{F_{\text{НПКСТ}}}{\rho_{\text{НПКСЖ}}}, \quad (1)$$

где $Q_{1\text{Ж}}$ — расход жидкой фазы НПКС, поступающей на репульпацию, $\text{м}^3/\text{сут}$; $M1$ — влажность кека после первой стадии фильтрации, доли ед.; $\rho_{\text{НПКСЖ}}$ — плотность жидкой фазы НПКС, $\text{кг}/\text{м}^3$;

$$Q_{2\text{Ж}} = Q_{\text{НПКСЖ}} - Q_{1\text{Ж}}, \quad (2)$$

где $Q_{2\text{Ж}}$ — расход фильтрата, образующегося после первой стадии фильтрации, $\text{м}^3/\text{сут}$.

Уравнение материального баланса по жидкой фазе для стадии репульпации выглядит следующим образом:

$$Q_{3\text{Ж}} = Q_{1\text{Ж}} + Q_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{M1}{1 - M1} \frac{F_{\text{НПКСТ}}}{\rho_{\text{НПКСЖ}}} + Q_{\text{H}_2\text{O}}, \quad (3)$$

$$\rho_{3\text{Ж}} = \frac{Q_{1\text{Ж}} \rho_{\text{НПКСЖ}} + Q_{\text{H}_2\text{O}} \rho_{\text{H}_2\text{O}}}{Q_{3\text{Ж}}}, \quad (4)$$

где $Q_{3\text{Ж}}$ — количество жидкой фазы НПКС, направляемой вместе с твердой на вторую ступень фильтрации, $\text{м}^3/\text{сут}$; $\rho_{\text{НПКСЖ}}$ и $\rho_{\text{H}_2\text{O}}$ — плотности жидкой фазы НПКС и воды соответственно, $\text{кг}/\text{м}^3$; $\rho_{3\text{Ж}}$ — плотность жидкой фазы НПКС после стадии репульпации, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Балансовые соотношения по компонентам жидкой фазы стадии репульпации имеют вид

$$Q_{3\text{Ж}} C_{\text{Zn}} = Q_{1\text{Ж}} C_{\text{Zn}}^{\text{НПКСЖ}}, \quad (5)$$

$$Q_{3\text{Ж}} C_{\text{Cu}} = Q_{1\text{Ж}} C_{\text{Cu}}^{\text{НПКСЖ}}, \quad (6)$$

$$Q_{3\text{Ж}} C_{\text{Cd}} = Q_{1\text{Ж}} C_{\text{Cd}}^{\text{НПКСЖ}}, \quad (7)$$

$$Q_{3\text{ж}} C_{3\text{H}_2\text{SO}_4} = Q_{1\text{ж}} C_{\text{H}_2\text{SO}_4}^{\text{НПКС*}}, \quad (8)$$

где $C_{3\text{Zn}}$, $C_{3\text{Cu}}$, $C_{3\text{Cd}}$, $C_{3\text{H}_2\text{SO}_4}$ — содержания цинка, меди, кадмия, серной кислоты в жидкой фазе НПКС после репульпации, г/л; $C_{\text{Zn}}^{\text{НПКС*}}$, $C_{\text{Cu}}^{\text{НПКС*}}$, $C_{\text{Cd}}^{\text{НПКС*}}$, $C_{\text{H}_2\text{SO}_4}^{\text{НПКС*}}$ — то же в жидкой фазе НПКС, г/л.

Материальный баланс по жидкой фазе на второй стадии фильтрации описывается уравнением

$$Q_{4\text{ж}} = \frac{\frac{M_2}{1-M_2} F_{\text{НПКСТ}} \left(\frac{F_{\text{НПКСТ}}}{\rho_{\text{НПКСТ}}} \frac{M_1}{1-M_1} + Q_{\text{H}_2\text{O}} \right)}{F_{\text{НПКСТ}} \frac{M_1}{1-M_1} + Q_{\text{H}_2\text{O}} \rho_{\text{H}_2\text{O}}}, \quad (9)$$

$$Q_{5\text{ж}} = Q_{3\text{ж}} - Q_{4\text{ж}}, \quad (10)$$

где M_2 — влажность кека после второй стадии фильтрации, доли ед.; $Q_{4\text{ж}}$, $Q_{5\text{ж}}$ — количества жидкой фазы НПКС и фильтрата после второй стадии фильтрации соответственно, м³/сут.

Остаточное содержание водорастворимого Zn в цинковом кеке определяется по формуле

$$F_{\text{Zn(ост)}}^{\text{K}} = C_{3\text{Zn}} Q_{4\text{ж}} = \frac{M_1/(1-M_1) M_2/(1-M_2) F_{\text{НПКСТ}} C_{\text{Zn}}^{\text{НПКС*}}}{M_1/(1-M_1) F_{\text{НПКСТ}} + Q_{\text{H}_2\text{O}} \rho_{\text{H}_2\text{O}}}. \quad (11)$$

Балансовые соотношения по твердой фазе, а также по ее компонентам имеют вид

$$F_{\text{K}} = F_{\text{НПКСТ}} + F_{\text{Zn(ост)}}^{\text{K}}, \quad (12)$$

$$F_{\text{K}} C_{\text{Zn}}^{\text{K}} = F_{\text{НПКСТ}} (C_{\text{Zn(ZnO)}}^{\text{НПКСТ}} + C_{\text{Zn(ZnS)}}^{\text{НПКСТ}} + C_{\text{Zn(ZnO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3)}^{\text{НПКСТ}} + C_{\text{Zn(ZnSO}_4)}^{\text{НПКСТ}}) + F_{\text{Zn(ост)}}^{\text{K}}, \quad (13)$$

$$F_{\text{K}} C_{\text{Pb}}^{\text{K}} = F_{\text{НПКСТ}} C_{\text{Pb(PbSO}_4)}^{\text{НПКСТ}}, \quad (14)$$

$$F_{\text{K}} C_{\text{Cd}}^{\text{K}} = F_{\text{НПКСТ}} (C_{\text{Cd(CdO)}}^{\text{НПКСТ}} + C_{\text{Cd(CdS)}}^{\text{НПКСТ}} + C_{\text{Cd(CdO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3)}^{\text{НПКСТ}}), \quad (15)$$

$$F_{\text{K}} C_{\text{Fe}}^{\text{K}} = F_{\text{НПКСТ}} (C_{\text{Fe(ZnO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3)}^{\text{НПКСТ}} + C_{\text{Fe(CuO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3)}^{\text{НПКСТ}} + C_{\text{Fe(CdO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3)}^{\text{НПКСТ}} + C_{\text{Fe(Fe}_2\text{O}_3)}^{\text{НПКСТ}}), \quad (16)$$

$$F_{\text{K}} C_{\text{Cu}}^{\text{K}} = F_{\text{НПКСТ}} (C_{\text{Cu(CuO)}}^{\text{НПКСТ}} + C_{\text{Cu(CuS)}}^{\text{НПКСТ}} + C_{\text{Cu(CuO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3)}^{\text{НПКСТ}}), \quad (17)$$

$$F_{\text{K}} C_{\text{SiO}_2}^{\text{K}} = F_{\text{НПКСТ}} C_{\text{SiO}_2}^{\text{НПКСТ}}, \quad (18)$$

$$F_{\text{K}} C_{\text{O}_2}^{\text{K}} = F_{\text{НПКСТ}} (C_{\text{O}_2(\text{ZnO})}^{\text{НПКСТ}} + C_{\text{O}_2(\text{CuO})}^{\text{НПКСТ}} + C_{\text{O}_2(\text{CdO})}^{\text{НПКСТ}} + C_{\text{O}_2(\text{ZnSO}_4)}^{\text{НПКСТ}} + C_{\text{O}_2(\text{ZnO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3)}^{\text{НПКСТ}} + C_{\text{O}_2(\text{CuO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3)}^{\text{НПКСТ}} + C_{\text{O}_2(\text{CdO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3)}^{\text{НПКСТ}}) + F_{\text{Zn(ост)}}^{\text{K}} z, \quad (19)$$

где C_{Zn}^{K} , C_{Pb}^{K} , C_{Cd}^{K} , C_{Fe}^{K} , C_{Cu}^{K} , $C_{\text{SiO}_2}^{\text{K}}$, $C_{\text{O}_2}^{\text{K}}$ — соответственно содержания в кеке цинка, свинца, кадмия, железа, меди, кремнезема и кислорода, доли ед.; $C_{\text{Zn(НПКСТ)}}^{\text{НПКСТ}}$, $C_{\text{Pb(НПКСТ)}}^{\text{НПКСТ}}$, $C_{\text{Cd(НПКСТ)}}^{\text{НПКСТ}}$, $C_{\text{Fe(НПКСТ)}}^{\text{НПКСТ}}$, $C_{\text{Cu(НПКСТ)}}^{\text{НПКСТ}}$, $C_{\text{SiO}_2(\text{НПКСТ})}^{\text{НПКСТ}}$ и $C_{\text{O}_2(\text{НПКСТ})}^{\text{НПКСТ}}$ — содержания в составе твердой фазы НПКС цинка, свинца, кадмия, железа, меди, кремнезема и кислорода из соответствующих соединений (указано в скобках), доли ед.; z — стехиометрический коэффициент пересчета.

Балансовые соотношения стадии объединения фильтратов выглядят следующим образом:

$$Q_{\phi} = Q_{2\text{ж}} + Q_{5\text{ж}}, \quad (20)$$

$$\rho_{5\text{ж}} = \frac{Q_{1\text{ж}} \rho_{\text{НПКСТ}} + Q_{\text{H}_2\text{O}} \rho_{\text{H}_2\text{O}}}{Q_{1\text{ж}} + Q_{\text{H}_2\text{O}}}, \quad (21)$$

$$\rho_{\phi} = \frac{Q_{2\text{ж}} \rho_{\text{НПКСТ}} + Q_{5\text{ж}} \rho_{5\text{ж}}}{Q_{2\text{ж}} + Q_{5\text{ж}}}. \quad (22)$$

Материальный баланс по компонентам жидкой фазы можно записать как

$$Q_{\phi} C_{\text{Zn}}^{\phi} = Q_{2\text{ж}} C_{\text{Zn}}^{\text{НПКС*}} + Q_{5\text{ж}} C_{3\text{Zn}}, \quad (23)$$

$$Q_{\phi} C_{\text{Cu}}^{\phi} = Q_{2\text{ж}} C_{\text{Cu}}^{\text{НПКС*}} + Q_{5\text{ж}} C_{3\text{Cu}}, \quad (24)$$

$$Q_{\phi} C_{\text{Cd}}^{\phi} = Q_{2\text{ж}} C_{\text{Cd}}^{\text{НПКС*}} + Q_{5\text{ж}} C_{3\text{Cd}}, \quad (25)$$

$$Q_{\phi} C_{\text{H}_2\text{SO}_4}^{\phi} = Q_{2\text{ж}} C_{\text{H}_2\text{SO}_4}^{\text{НПКС*}} + Q_{5\text{ж}} C_{3\text{H}_2\text{SO}_4}, \quad (26)$$

где C_{Zn}^{ϕ} , C_{Cu}^{ϕ} , C_{Cd}^{ϕ} , $C_{\text{H}_2\text{SO}_4}^{\phi}$ — содержания цинка, меди, кадмия и серной кислоты в фильтрате, г/л.

АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Система соотношений (1)–(26) представляет математическую модель процесса фильтрации цинковых кеков, особенности которой позволяют перейти к ее топологическому аналогу. На рис. 2 представлен сигнальный граф исследуемого процесса, отражающий причинно-следственные связи между переменными системы уравнений.

Коэффициентам передач графа соответствуют следующие соотношения:

$$a_0 = \frac{M_1}{(1-M_1)\rho_{\text{НПКСТ}}}, a_2 = a_7 = -1, a_5 = \frac{M_2(1-M_2)^{-1} Q_{3\text{ж}}}{Q_{1\text{ж}} + Q_{\text{H}_2\text{O}} \rho_{\text{H}_2\text{O}}}$$

$$a_{10} = C_{3\text{Zn}}, \quad a_1 = a_3 = a_4 = a_6 = a_8 = a_9 = a_{11} = a_{12} = 1,$$

$$a_{13} = C_{\text{Zn}}^{\text{НПКС*}} Q_{\phi}^{-1}, \quad a_{14} = C_{3\text{Zn}} Q_{\phi}^{-1}, \quad a_{15} = C_{\text{Cu}}^{\text{НПКС*}} Q_{\phi}^{-1},$$

$$a_{16} = C_{3\text{Cu}} Q_{\phi}^{-1}, \quad a_{17} = C_{3\text{Cd}} Q_{\phi}^{-1}, \quad a_{18} = C_{3\text{H}_2\text{SO}_4} Q_{\phi}^{-1},$$

$$a_{19} = C_{\text{HПКС}_\tau}^{\text{HПКС}_\tau} Q_\phi^{-1}, \quad a_{20} = C_{\text{H}_2\text{SO}_4}^{\text{H}_2\text{SO}_4} Q_\phi^{-1},$$

$$a_{21} = (C_{\text{Zn}(\text{ZnO})}^{\text{HПКС}_\tau} + C_{\text{Zn}(\text{ZnS})}^{\text{HПКС}_\tau} + \\ + C_{\text{Zn}(\text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3)}^{\text{HПКС}_\tau} + C_{\text{Zn}(\text{ZnSO}_4)}^{\text{HПКС}_\tau}) / C_{\text{Zn}}^{\text{K}},$$

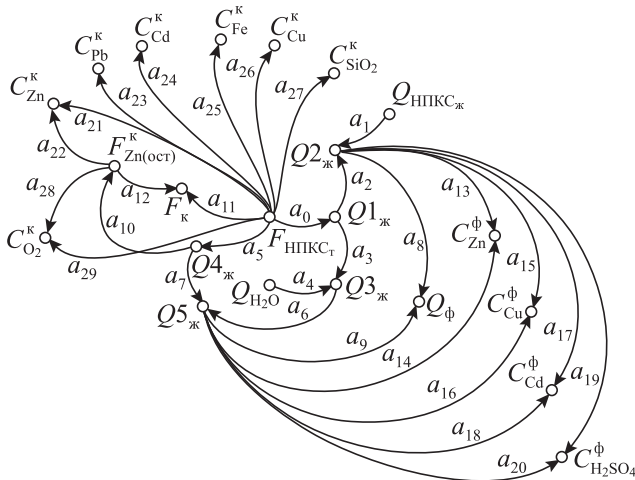


Рис. 2. Сигнальный граф процесса фильтрации цинковых кеков

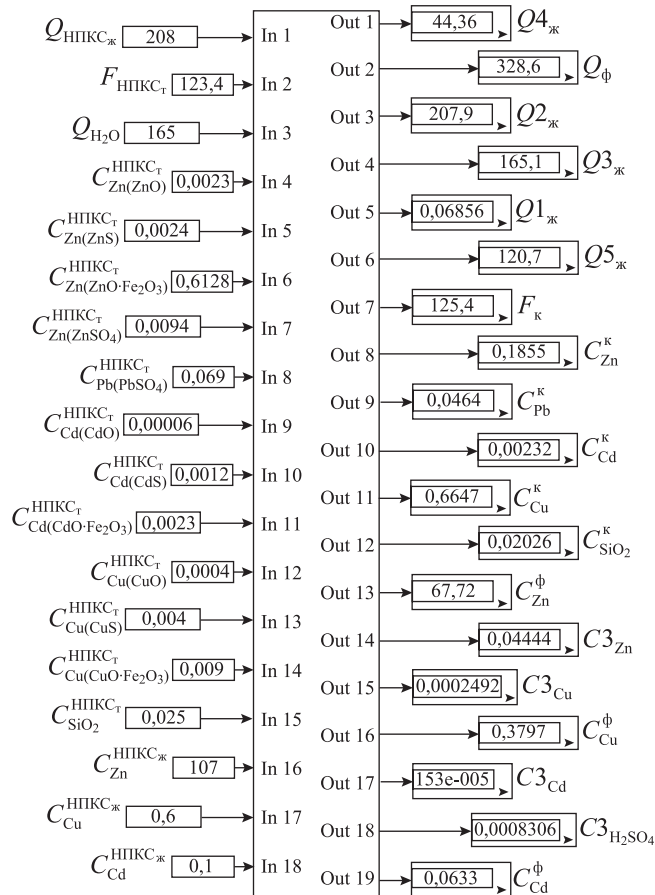


Рис. 3. Simulink-модель процесса фильтрации

$$a_{22} = F_K^{-1}, \quad a_{23} = C_{\text{Pb}(\text{PbSO}_4)}^{\text{HПКС}_\tau} / F_K,$$

$$a_{24} = (C_{\text{Cd}(\text{CdO})}^{\text{HПКС}_\tau} + C_{\text{Cd}(\text{CdS})}^{\text{HПКС}_\tau} + C_{\text{Cd}(\text{CdO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3)}^{\text{HПКС}_\tau}) / F_K,$$

$$a_{25} = (C_{\text{Fe}(\text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3)}^{\text{HПКС}_\tau} + C_{\text{Fe}(\text{CuO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3)}^{\text{HПКС}_\tau} + \\ + C_{\text{Fe}(\text{CdO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3)}^{\text{HПКС}_\tau} + C_{\text{Fe}(\text{Fe}_2\text{O}_3)}^{\text{HПКС}_\tau}) / F_K,$$

$$a_{26} = (C_{\text{Cu}(\text{CuO})}^{\text{HПКС}_\tau} + C_{\text{Cu}(\text{CuS})}^{\text{HПКС}_\tau} + C_{\text{Cu}(\text{CuO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3)}^{\text{HПКС}_\tau}) / F_K,$$

$$a_{27} = C_{\text{SiO}_2}^{\text{HПКС}_\tau} / F_K,$$

$$a_{28} = (C_{\text{O}_2(\text{ZnO})}^{\text{HПКС}_\tau} + C_{\text{O}_2(\text{CuO})}^{\text{HПКС}_\tau} + C_{\text{O}_2(\text{CdO})}^{\text{HПКС}_\tau} + C_{\text{O}_2(\text{ZnSO}_4)}^{\text{HПКС}_\tau} + \\ + C_{\text{O}_2(\text{PbSO}_4)}^{\text{HПКС}_\tau} + C_{\text{O}_2(\text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3)}^{\text{HПКС}_\tau} + C_{\text{O}_2(\text{CuO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3)}^{\text{HПКС}_\tau} + \\ + C_{\text{O}_2(\text{CdO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3)}^{\text{HПКС}_\tau} + C_{\text{O}_2(\text{Fe}_2\text{O}_3)}^{\text{HПКС}_\tau}) / F_K, \quad a_{29} = z / F_K.$$

Топологическая модель была реализована в приложении Simulink вычислительной среды MATLAB (рис. 3). При проведении вычислительного эксперимента с помощью Simulink-модели использовались промышленные данные ОАО «Электроцинк» (г. Владикавказ). С помощью имитационной модели получены статические характеристики объекта моделирования (рис. 4 и 5).

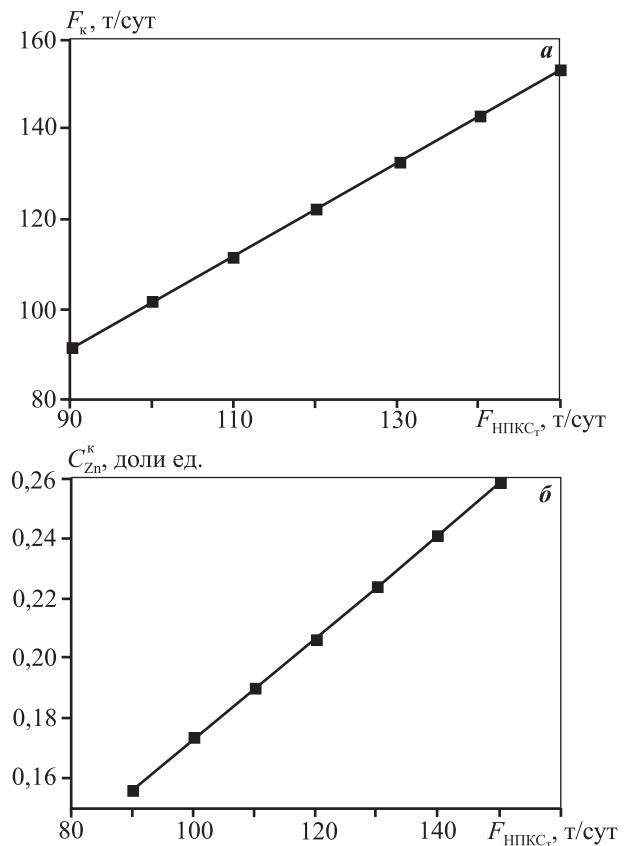


Рис. 4. Зависимости расхода кека (а) и содержания в нем цинка (б) от расхода твердой фазы НПКС

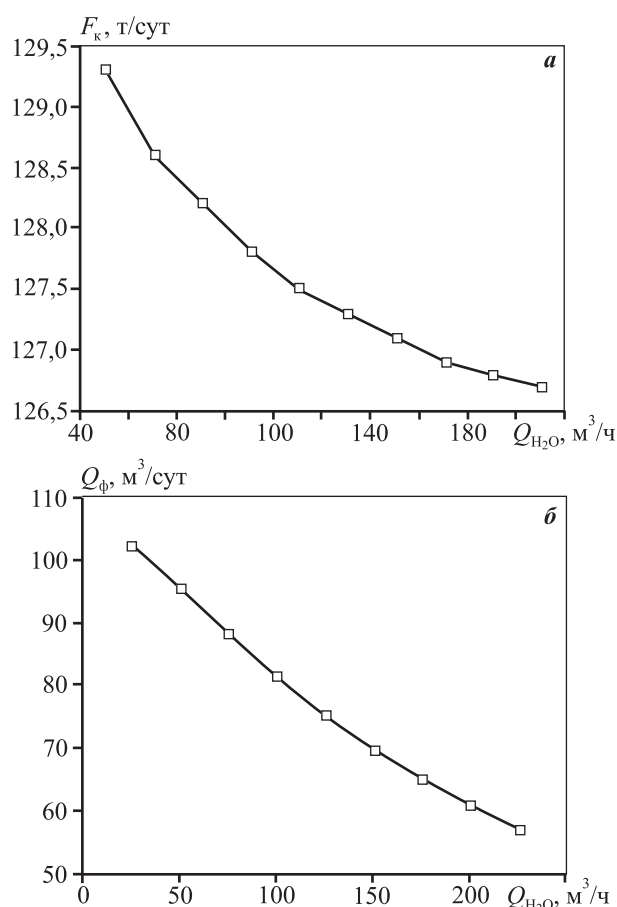


Рис. 5. Зависимости расходов кека (а) и фильтрата (б) от расхода воды

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная математическая модель может быть использована при анализе функционирования действующих производственных систем фильтрации кеков в производстве цинка, а также для установления расходных норм по сырью, определения технологических показателей и неучтенных потерь компонентов сырья в условиях промышленной эксплуатации.

Результаты работы получены при поддержке проекта № 265 г/б «Развитие математических методов оптимального управления на множестве взаимосвязанных траекторий непрерывных технологических процессов», выполняемого в рамках государственного задания № 2014/207.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белоглазов И.Н., Голубев В.О., Зиязитдинова О.В. и др. // Цв. металлы. 2005. № 7. С. 26—29.
2. Уткин Н.И. Производство цветных металлов. 2-е изд. М.: Интермет Инжиниринг, 2004.
3. Белоглазов И.Н., Голубев В.О., Тихонов О.Н. и др. Фильтрация технологических пульп. М.: Изд. дом «Руда и металлы», 2003.
4. Снурников А.П. Гидрометаллургия цинка. М.: Металлургия, 1981.
5. Жужиков В.А. Фильтрация. Теория и практика разделения суспензий. 3-е изд. М.: Химия, 1971.
6. Доброхотов Г.Н. Гидрометаллургические процессы и аппараты: Учеб. пос. Ленинград: Изд-во Ленингр. горн. ин-та, 1976.
7. Романков П.Г., Курочкина М.И. Гидромеханические процессы химической технологии. 3-е изд. Перераб. и доп. Л.: Химия, 1982.
8. Tarleton S., Wakeman R. // Filtration: equipment selection, modeling and process simulation. N.Y.: Elsevier Advanced Technology, 1999. P. 437.
9. Козлов П.А., Колесников А.В., Белоусов В.Н. // Цв. металлургия. 1996. № 4. С. 17—21.
10. Гуськов В.А., Ивановский М.Д. // Цв. металлы. 1973. № 8. С. 9—11.
11. Колесников А.В., Шумилин Ю.П., Асадуллин Р.Р., Сухобоков А.С. // Там же. 2009. № 12. С. 35—37.
12. Рутковская И.А., Данилин Н.А., Рутковский А.Л. // Изв. вузов. Цв. металлургия. 1992. № 5-6. С. 49—52.
13. Козлов П.А., Колесников А.В. // Цв. металлургия. 1995. № 7-8. С. 21—23.